第 38 卷第 6 期　　生　态　学　报　　Vol.38,No.6
2018 年 3 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Mar.,2018

DOI: 10.5846/stxb201703210482
徐雨晴,周波涛,於琍,石英,徐影.气候变化背景下中国未来森林生态系统服务价值的时空特征.生态学报,2018,38(6):1952-1963.
Xu Y Q, Zhou B T, Yu L, Shi Y, Xu Y.Temporal-spatial dynamic pattern of forest ecosystem service value affected by climate change in the future in China.Acta Ecologica Sinica,2018,38(6):1952-1963.

气候变化背景下中国未来森林生态系统服务价值的时空特征

徐雨晴,周波涛,於　琍*,石　英,徐　影
中国气象局国家气候中心,北京　100081

摘要:基于用 CEVSA 模型计算的 NPP 及 Costanza 等提出的生态系统服务价值计算方法,分析了基准期(1971—2000 年)及未来(2021—2050 年)我国森林生态系统服务价值时空动态变化特征。结果表明,基准期及未来 RCP4.5、RCP8.5 两情景下,我国森林生态系统服务总价值均呈逐年增加趋势,年均值分别为 12.80(4.55—20.72)万亿元、14.81(5.26—23.97)万亿元、15.13(5.38—24.49)万亿元。总价值在空间上均呈现出西部、东北低及南部高的格局。未来总价值除了在少数地区(新疆中部、内蒙古西部、甘肃西北部、西藏东南部以及我国东北和南方部分森林边缘地区)将降低外,在其他地区均增加,且增幅在东部大于西部,南部大于北部,其中华南增幅最大(RCP4.5、RCP8.5 情景下年均增幅分别达 1.87 亿元、2.13 亿元)。高增幅比例(>45%)主要分布在我国东北北端。生态系统服务各功能构成项对总价值的贡献率依次为:土壤形成与保护(17.8%)>气体调节(16.0%)>生物多样性保护(14.9%)>水源涵养(14.6%)>气候调节(12.4%)>原材料生产(11.9%)>废物处理(6.0%)>娱乐文化(5.9%)>食物生产(0.5%),即物质产品产出价值(12.4%)远低于非物质价值(87.6%)。揭示了未来 30 年我国森林生态系统服务价值的时空格局动态演化及气候变化的影响,为气候变化背景下合理利用森林资源、促进生态环境保护及实施可持续发展战略提供科学量化的依据。

关键词:森林生态系统;服务功能;价值评估;典型浓度路径(RCPs);时空特征;中国

Temporal-spatial dynamic pattern of forest ecosystem service value affected by climate change in the future in China

XU Yuqing, ZHOU Botao, YU Li*, SHI Ying, XU Ying
National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, *China*

Abstract: The temporal and spatial dynamics in forest ecosystem service value from 1971 to 2000 as a baseline period and the predicted values from 2021 to 2050 in China were analyzed using the calculation method put forward by Costanza, etc., which is based on the NPP data from the CEVSA model. The results show that the total forest ecosystem service value had an increasing trend, with an annual mean of 12.80 (4.55—20.72) × 10^{12}, 14.81 (5.26—23.97) × 10^{12}, and 15.13 (5.38—24.49) × 10^{12} yuan, respectively, for the baseline period and in the future under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. The space distribution was characterized by lower values in the west and northeast, and higher values in the south of China. The values decreased in relatively small areas i.e., the center of Xinjiang, the west of Inner Mongolia, the northwest of Gansu, the southeast of Tibet, and some forest edges in Northeast China and southern areas, but increased in other regions in the future, relative to the baseline period. The higher amplitude increases in the east and south, and the lower ones in the west and north were examined. The greatest annual rise was 1.87×10^{12} and 2.13×10^{12} under the RCP4.5

基金项目:中国气象局气候变化专项(CCSF201731)
收稿日期:2017-03-21;　　**网络出版日期**:2017-12-19

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yuli@ cma.cn

and RCP8.5 scenarios, respectively, in South China. The relatively high increase in percentage (> 45%) was in the north of Northeast China. The contribution rates to service value for individual forest ecosystem function were in the order: soil formation and protection (17.8%) > gas regulation (16.0%) > biodiversity protection (14.9%) > water conservation (14.6%) > climate regulation (12.4%) > raw material production (11.9%) > waste treatment (6.0%) > recreation and culture (5.9%) > food production (0.5%). This study revealed a dynamic evolution pattern for forest ecosystem service values in the future and its corresponding response to climate change in China, which is conducive to providing a scientific and quantitative basis for utilizing forest resources rationally, promoting ecological environment protection, and implementing the sustainable development strategy under climate change.

Key Words: forest ecosystem; service function; value evaluation; RCPs; temporal and spatial characteristics; China

森林是陆地生态系统的主体,具有调节气候、吸收二氧化碳、涵养水源、保持水土、防风固沙、保护生物多样性等重要生态功能和提供物质产品功能,对维持生态系统平衡、维系经济和社会的可持续发展以及保护生态环境都具有重要的作用。生态系统服务不仅为人类的生产生活提供必需的生态产品,而且为生命系统提供必需的自然条件和效用。森林生态系统服务功能主要体现在 3 个方面:生产功能,即提供人类所需的实物;生态服务功能,即森林的多种生态效益;社会文化功能,即森林的社会效益[1]。

工业革命以来,全球正经历着以气候变暖为突出标志的气候变化,这对全球和区域自然生态系统和人类社会均产生了深刻影响;同时,人类对自然资源不合理的开发利用,致使生态环境破坏,对生态系统服务功能可能造成严重损害,导致其服务价值大幅下降,从而引起世界各国的普遍关注。计算生态系统的服务价值,并将其纳入国民经济核算体系,能有效降低对生态系统服务功能的损害,有利于人类自身的可持续发展[2],因而许多专家、学者,政府部门以及国际组织都很重视并相应开展了大量生态系统服务价值相关的评估和研究工作,取得显著成果。

早在 20 世纪 50 年代,国外就开始了生态系统服务价值的评估和研究工作,并试图将生态系统服务效益的价值评估纳入国民经济核算体系[3-4]。早期对森林生态系统服务价值的研究,主要偏向于计算其直接经济价值、森林游憩价值等。20 世纪 90 年代起出现大量更深入的探索,取得突破性进展,最具有代表性的如 Costanza 等[3]对全球生态系统服务及其价值的研究,其中将森林生态系统划分为热带森林和北方森林两类,以 17 种服务功能指标、按 10 种生物群系估算出全球生态系统服务年总价值为(16—54)万亿美元。近几年,生态系统服务价值的相关研究更多地倾向于对全球不同区域的生态系统服务文化价值评估[5]、基于土地利用[6-7]及景观格局[8]的生态系统服务价值及其变化估算、对全球水域生态系统服务价值的估算及调查[9-10],对于全球生态系统服务总价值及其变化估算也仍在持续[11],对于影响因子的研究也非常普遍,包括土地利用的变化[6-7]、城市技术变化的影响[12]等,其中以土地利用变化的影响研究最多。对于森林生态系统服务价值而言,主要研究内容包括对特定区域或国家的生态系统服务价值估算及相关分析,如 REDD+机会成本分析[13]、社会价值应用分析[14],以及驱动森林生态系统服务价值变化的因素探讨[15],等等。

我国关于生态服务功能及价值的研究起始于 20 世纪 80 年代初。对森林价值和计量的研究开始也比较晚,直至 1988 年初,国务院发展研究中心才首次提出开展资源核算并将其纳入国民经济核算体系中,之后对森林生态系统服务功能系统性地评估工作才真正开始。2000 年以后,关于森林生态系统服务价值的研究成为生态学与经济学领域的一大热点,研究成果大量涌现,既有针对自然林的研究,也有针对城市森林、森林公园、自然保护区等的研究;既有针对全国的大尺度研究,也有针对县市甚至更小尺度的研究。在全国尺度上,较早的评估工作有:侯元兆等[16]采用 2 种方法对中国森林资源进行了经济价值评估,得出其每年总价值分别为 13.7 万亿元和 11.1 万亿元;蒋延玲等[17]对我国 38 种主要森林类型生态系统公益价值作了评价,得出其总价值约为 117.401 亿美元。随后,一批学者(赵景柱等[18]、赵同谦等[19]、靳芳等[20]、余新晓等[21]、鲁绍伟[22]等)采用全国森林资源清查数据,根据各自选取的指标对中国森林生态系统服务价值进行了核算。2008 年,

《森林生态系统服务功能评估规范(LY/T 1721—2008)》标准[23]发布,此后,利用该规范在全国、省、市级以及自然保护区等尺度上对我国森林生态系统服务功能进行了大量的价值评估工作。近几年,我国的相关工作以不同地区生态系统服务价值在近几十年的时空分布及其对土地利用变化、土地退化、生态恢复等的响应关系研究居多[24-26]。其中,对于森林生态系统服务价值的动态评估主要集中在部分省市(如建阳市[27]),以及特定的区域(如喀纳斯保护区[28]、秦岭[29])。这些研究对于加深森林生态系统服务价值的评估起到了积极的促进作用,也对引起人们关注森林生态系统的服务效益具有重要的引导意义。

气候变化已对自然生态系统和人类社会产生了不利影响,未来气候变暖将持续,将给经济社会发展带来越来越显著的影响,并成为人类经济社会发展的风险。在当今全球气候变暖、生态环境日益恶化、自然资源日趋短缺的大背景下,气候变化对生态系统服务价值的影响达到了何种程度?未来会怎样?在全国范围地域差异如何?等等,这些都还未能明确回答。在气候变化背景下,动态、定量的森林生态系统服务价值评估,对于回答这些科学问题,并对于认识把握气候规律、科学应对气候变化,以及对未来生态系统的管理对策制定均具有重要意义。然而,目前国内外与气候变化相关的研究工作,特别是对未来的预估研究都还相当缺乏。国外也仅限于近年对全球[30]及部分地区(如西非[31])气候、土地利用变化、管理模式的未来可能影响等有限的研究探讨。国内近十几年也只是偶有未来全国范围[32]及部分区域(如白河流域[33])森林生态系统服务价值的动态变化及其对气候变化的响应研究。鉴于此,本研究以基于动态变化的气候因子变量及生态、环境因子等参数采用 CEVSA 模型模拟出的 NPP 为基础,依据 Costanza 等[3]、谢高地等[34]提出的生态系统服务价值相关的计算方法,分析并展示了未来(2021—2050 年)(相对于基准期(1971—2000 年))我国森林生态系统服务价值时空动态变化格局,揭示出森林生态系统服务多功能效益发挥的规模与幅度以及气候变化的可能影响。由于生态系统服务功能的发挥受限于生态系统的承载力阈值[35],本研究通过基于气候条件及生态因子的动态模拟,以及进一步的森林生态系统服务价值分析,将有助于界定森林生态系统的承载力阈值。以期本研究能为未来科学应对气候变化、改善森林生态系统管理、加强生态环境建设提供科学依据,为将来的综合经济核算提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源及处理

CEVSA 模型是一个基于生理生态过程模拟植物-土壤-大气系统能量交换和水碳氮耦合循环的生物地球化学循环模型[36]。本文采用 CEVSA 模型,以每 10 天平均的气温、降水、云量、相对湿度 4 个气候因子,逐年大气二氧化碳浓度作为输入变量,以氮沉降、植被 C/N、土壤质地等因子作为输入参数,以遥感土地利用类型为基础,结合 CEVSA 模型的输入植被参数划分植被类型,计算得出我国逐年净初级生产力(NPP)。气候数据为使用区域气候模式 RegCM4.4 在国家气候中心的全球模式 BCC_CSM1.1 驱动下进行的水平分辨率为 50km ×50km 的模拟结果。为了消除模式数据的系统误差,本研究首先将模拟结果进行了误差订正,随后采用澳大利亚 ANUSPLIN3.1 样条函数插值法内插至 0.1°×0.1°(经纬度)。首先,将 1971—2000 年多年平均气候数据输入 CEVSA 模型进行模拟直至其达到生态系统平衡态,以消除初始输入对模型模拟的影响。然后,用 1961—2100 年逐旬气候数据对 NPP 进行动态模拟。

RCPs 是一种以未定浓度为特征的较常用气候变化情景,在 IPCC 第五次评估报告中使用,相对于 SRES 排放情景而言增加了应对气候变化的各种政策对未来排放的影响。限于资料可获得性,未能找到 RCP2.6 的驱动场,故本文选取中低排放(RCP4.5)和高排放(RCP8.5)两个典型浓度路径作为未来排放预估情景,对应的是 2100 年总辐射强迫相对于 1750 年达到 4.5W/m^2 和 8.5W/m^2。本研究中,1961—2100 年的年均 NPP 数据中,1961—2005 年为历史模拟数据,2006—2100 年为 RCPs 预估数据。鉴于目前国内外对未来生态系统服务价值研究中预估时段一般截至 2050 年[30-31]或 2040 年[33],故本研究对未来的预估时段选取为 2021—2050 年,选取预估研究中常用的 1971—2000 年作为基准期。

1.2　生态系统服务价值核算方法

在研究生态系统服务价值的方法中,由 Costanza 等[3] 和谢高地等[34] 研究的方法模型近年来得到了国内学者的广泛应用。关于生态系统服务价值估算,谢高地等人在 Costanza 等提出的生态系统服务价值评价方法的基础上,研究提出了适合中国实际情况的 9 项生态系统服务功能和相应的修正算法。所以本文以 Costanza 等[3] 提出的"生态系统服务价值计算方法"(公式 1)和谢高地等[34] 提出的"我国平均状态下的单位面积生态系统服务价值单价表"中森林各服务项目情况(表 1)等研究成果为基础,对 1971—2000 年历史时期及未来 2021—2050 年 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下我国森林生态系统服务价值进行逐年计算,计算公式如下:

$$\mathrm{ESV} = \sum P_j \times A_j \qquad (1)$$

式中:ESV 为我国森林生态系统服务的总价值;P_j 为单位面积上土地利用类型 j 的生态系统服务功能价值;A_j 为研究区内土地利用类型 j 的面积。本文中 $j=1$,表示土地利用类型只有森林一种,下同。由于人类活动导致的土地利用变化等对生态系统服务价值具有显著的影响[6-7,24],本研究为了揭示气候变化的可能影响,因而假定森林面积不变。

表 1　我国森林单位面积生态系统服务价值单价/(元/hm^2)

Table 1　Chinese ecosystem service value per unit area of forest ecosystem type

服务项目 Service items	单价 Unit price	服务项目 Service items	单价 Unit price
气体调节 Gas regulation	3097.0	生物多样性保护 Biodiversity protection	2884.6
气候调节 Climate regulation	2389.1	食物生产 Food production	88.5
水源涵养 Water conservation	2831.5	原材料生产 Raw material production	2300.6
土壤形成与保护 Soil formation and protection	3450.9	娱乐文化 Recreation and culture	1132.6
废物处理 Waste treatment	1159.2		

表 1 仅提供了一个全国平均状态的生态系统生态服务价值的单价,而生态系统的服务功能大小与该生态系统的生物量有密切关系,一般而言,生物量越大,生态服务功能越强。因此,假定生态服务功能强度与生物量成线性关系,提出生态服务价值的生物量因子按下述公式来进一步修订生态服务价值的单价[34]:

$$P_{ij} = (b_j / \mathrm{B}) p_{ij} \qquad (2)$$

式中:P_{ij} 为订正后的单位面积第 j 类生态系统(这里指森林生态系统)第 i 种生态系统服务功能的价值量,$i=1,2,\cdots,9$,分别代表气体调节、气候调节、水源涵养、土壤形成与保护、废物处理、生物多样性保护、食物生产、原材料生产、娱乐文化共 9 项; B 为我国一级森林生态系统类型单位面积平均生物量,为 77.4Mg/hm^2[37];p_{ij} 为表 1 中第 j 类生态系统第 i 种服务功能的全国平均价值量;b_j 为第 j 类生态系统的生物量,推算公式为:$b_j = 17 \cdot \mathrm{NPP}/0.5$,NPP 单位为 gC/$m^2$。$b_j$ 推算过程如下:

目前,我国已有特定地区分物种或分森林类型的生物量与 NPP 相关关系的模拟研究,而未有针对长时间序列全国尺度两者关系模拟的报道。因此,这里 b_j 为通过综合分析我国已有相关文献将 NPP 进行换算的生物量。这里参考的文献主要有方精云等[38]、Whittaker 等[39]、冯宗炜等[40]、刘世荣等[41]、李高飞等[42],此 5 项研究中生物量与生产力的比值分别为 6.04、24.59、27.52、14.74、11.93,取其平均值 17。生物量与碳之间的转换系数在不同树种之间存在差异,国际上通常以 0.5 作为生物量与碳之间的转换系数[43]。本文中 NPP 单位为 gC/m^2,换算成干物质量时,以 0.5 作为转换系数(除以 0.5)。

2　结果分析

2.1　中国森林生态系统服务价值年际变化

基准期(197—2000 年)及未来(2021—2050 年)RCP4.5 和 RCP8.5 情景下我国森林生态系统服务总价值均呈增加趋势,基准期与 RCP4.5 情景下增速相近,但均低于 RCP8.5 情景下的增速。而且,RCP8.5 情景下的

线性方程 R^2 最大,达 0.94(图 1)。基准期、未来 RCP4.5 及 RCP8.5 情景下我国森林生态系统服务总价值平均值分别为 12.80(4.55—20.72)万亿元、14.81(5.26—23.97)万亿元、15.13(5.38—24.49)万亿元,RCP4.5 及 RCP8.5 情景比基准期分别增加 2.0 万亿元、2.3 万亿元。

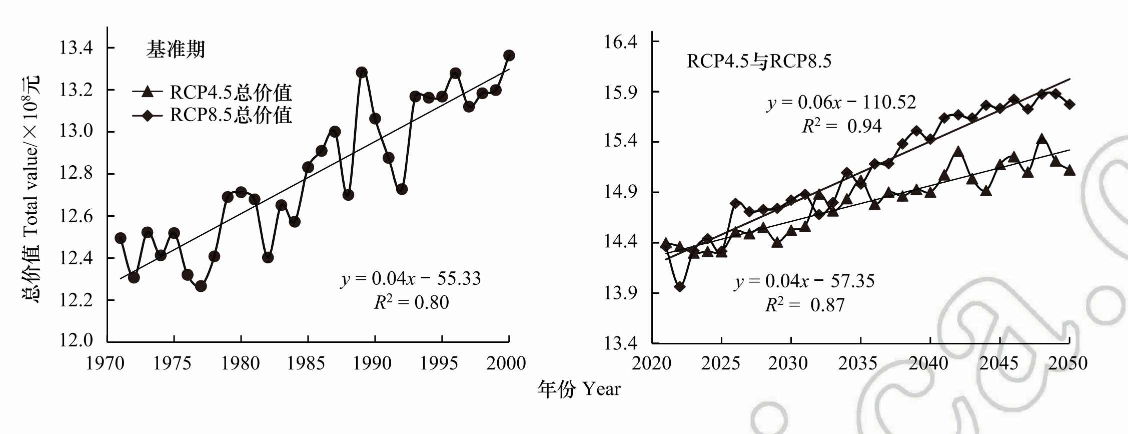


图 1 基准期及未来 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下我国森林生态系统服务总价值年际变化

Fig.1 Variation of forestry ecosystem service value from 1971 to 2000 as a baseline period and from 2021 to 2050 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios in China

我国森林生态系统服务价值及其各功能构成项贡献率(图 2),在基准期及未来 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下依次是:土壤形成与保护(2.285 亿元、2.643 亿元、2.700 亿元;17.8%)>气体调节(2.050 亿元、2.372 亿元、2.423亿元;16.0%)>生物多样性保护(1.910 亿元、2.209 亿元、2.257 亿元;14.9%)>水源涵养(1.875 亿元、2.169亿元、2.216 亿元;14.6%)>气候调节(1.582 亿元、1.830 亿元、1.869 亿元;12.4%)>原材料生产(1.523 亿元、1.762 亿元、1.800 亿元;11.9%)>废物处理(7674 万元、8878 万元、9071 万元;6.0%)>娱乐文化(7498 万元、8674 万元、8862 万元;5.9%)>食物生产(586 万元、678 万元、692 万元;0.5%),即物质产品产出价值占 12.4%(原材料生产+食物生产),非物质价值占 87.6%。从总体变化趋势来看,除了贡献率低的食物生产、废物处理及娱乐文化的年际变化不明显外,其余各构成项均呈增加趋势(图 3),但增加幅度均小于森林生态系统服务总价值。

2.2 中国森林生态系统服务价值空间分布

2.2.1 总价值及其变化

在基准期及未来 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,我国森林生态系统服务价值空间分布情况基本相同,均表现出在西部及东北低,特别是新疆、东北北部、四川及其邻近的西藏东南部等地区最低(<3.3 亿元/a);在南部高,特别是华南地区最高(>9.3 亿元/a)。RCP4.5 及 RCP8.5 情景下,生态系统服务价值在低值区域相对于基准期分布面积有所减少;在高值区域最高价值有所增加,分布面积也明显增加(图 4)。

相对于基准期,RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下我国森林生态系统服务总价值变化幅度均表现出相似的空间分布。除了在新疆中部、内蒙古西部、甘肃西北部、西藏东南部以及我国东北和南方部分森林边缘地区,森林生态系统服务总价值表现为减少外(RCP4.5 和 RCP8.5 情景下年均最大减幅分别达 1.42 亿元和 3.63 亿元),在其他地区均增加。总体而言,增加幅度在东部大于西部,南部大于北部,华南增加幅度最大,RCP4.5 和 RCP8.5 情景下年均最大增幅分别达 1.87 亿元和 2.13 亿元(图 5)。

分析未来 RCP4.5 与 RCP8.5 两种情景下(相对于基准期)我国森林生态系统服务总价值变化比例可知,RCP4.5 情景下减幅比例分布范围与图 5 一致,减幅比例最大达−100%;增幅比例普遍<30%,>45%的增幅比例主要分布在东北北端,最大增幅比例达 75.5%。RCP8.5 情景下减幅比例分布范围与图 5 一致,减幅比例最大达−176.0%;增幅比例普遍<30%,>45%的增幅比例主要分布在东北北端,最大增幅比例达 71.8%,但相对于 RCP4.5 情景,>45%的增幅比例分布范围明显更小,而 15%—30%增幅比例的分布范围相对增加(图 6)。

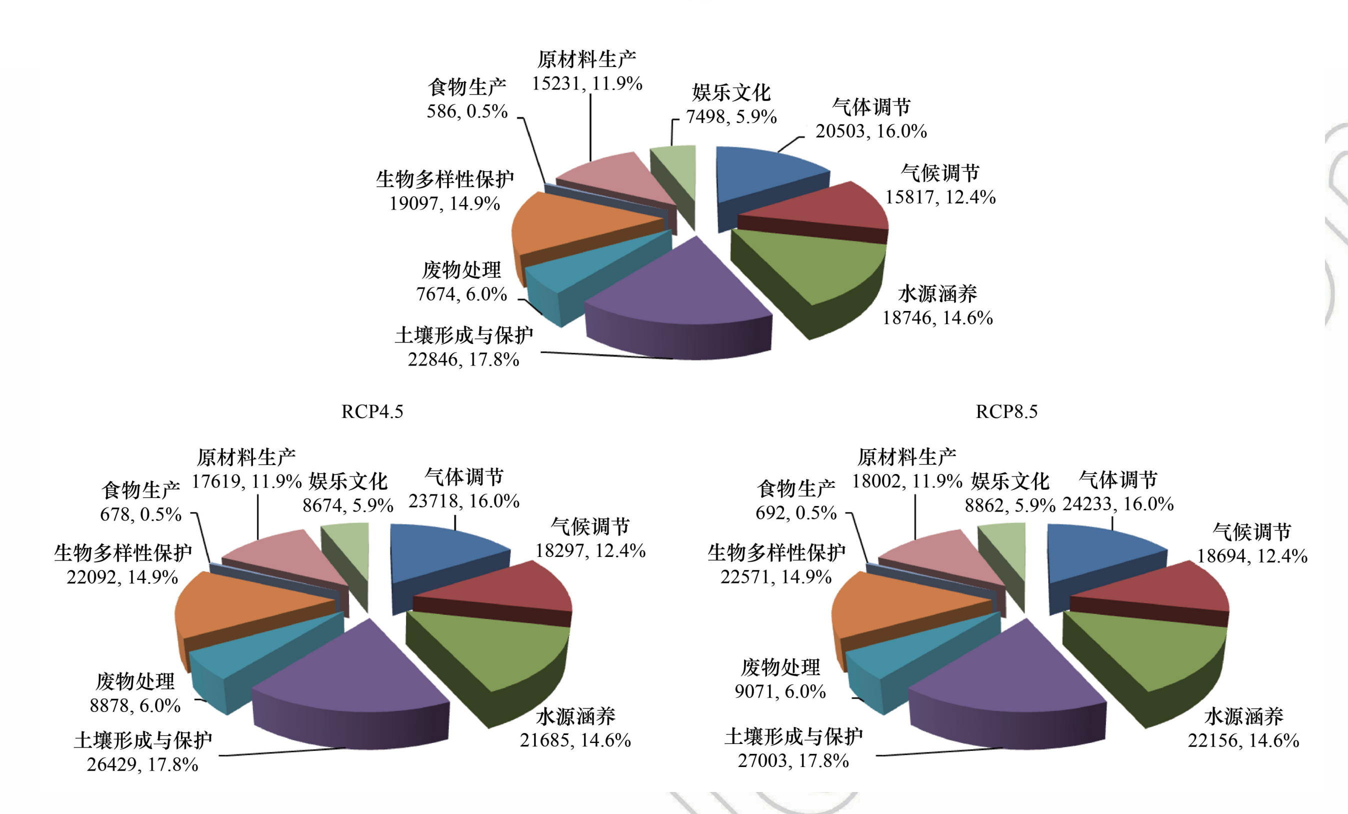


图 2　基准期及未来 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下我国森林生态系统服务价值各功能构成项贡献率

Fig.2　The contribution rates to service value for individual forest ecosystem function from 1971 to 2000 as a baseline period and from 2021 to 2050 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios in China

2.2.2　主要构成价值及其变化

土壤形成与保护是我国森林生态系统服务各项功能指标中的最主要构成项,其价值在全国范围的分布模式(图 7)与总价值(图 4)类似,但数值量级有差异。

土壤形成与保护的生态系统服务价值变化比例在全国范围的分布模式(图 8)与总价值变化比例(图 6)类似,但变化幅度稍有区别。

就变化比例而言,RCP4.5 和 RCP8.5 情景下土壤形成与保护(16.2% 和 18.4%)比总价值(15.6% 和 14.9%)平均变化比例大,其最高减幅比例明显更小,最高增幅比例更大。RCP4.5 情景下,土壤形成与保护功能价值的变化比例及其分布范围与总价值基本一致;RCP8.5 情景下,土壤形成与保护功能价值减幅分布范围明显更小,增幅分布范围有所增大,且大部分地区增幅比例增大(图 8)。

3　讨论

1971—2000 年我国森林生态系统服务价值为 12.80(4.55—20.72)万亿元,本结果跟侯元兆等[16]采用 2 种方法得出的年总价值 13.7 万亿元和 11.1 万亿元、王兵等[44]给出的 2009 年为 10.01 万亿元、谢高地等[45]给出的 2010 年为 17.5 万亿元的结果相近,但比其他前人根据不同方法计算的总价值偏高,如:蒋延玲等[17]给出 1984—1988 年中国 38 种主要森林生态系统效益的总价值为 117.401 亿美元;赵同谦等[19]给出 2000 年生态经济总价值为 1.406 万亿元;陈仲新等[46]为 1.543 万亿元;靳芳等[20]为 3.06 万亿元;鲁绍伟[22]给出 1993、1998、2003 年分别为 2.141 万亿元、3.643 万亿元、4.120 万亿元。据推测,这主要源于评估方法以及所选择指标的不一致。在之前的相关评估研究中,由于评估指标体系多样、评估方法有别、评估公式不统一,评估结果差异较大,难以彼此之间进行比较[19,47-48]。因此,制定客观、科学、与时俱进且能被公认、广泛接受的方法和指

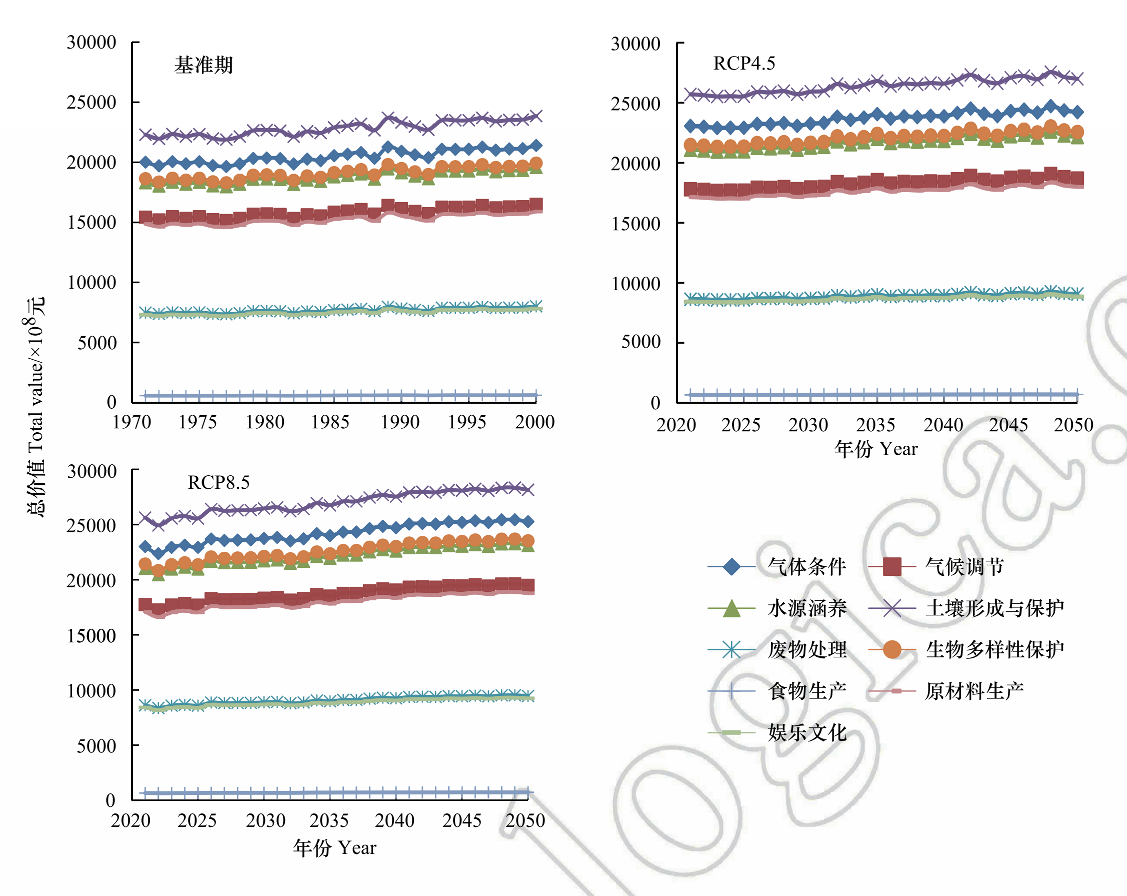


图 3 基准期及未来 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下我国森林生态系统服务价值各功能构成项年际变化

Fig.3 Changing trend of service value for individual forest ecosystem function from 1971 to 2000 as a baseline period and from 2021 to 2050 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios in China

标标准非常迫切和必要。

本研究预估的 2021—2050 年我国森林生态系统服务价值在 RCP4.5 及 RCP8.5 情景下分别为 14.81 (5.26—23.97)万亿元、15.13(5.38—24.49)万亿元,比基准期明显上升。这表明,虽然本研究是对中国森林生态系统服务价值在未来的初步估算,评估过程中存在一些不确定性,但可明确一点,在未来气候变暖的背景下,无论是中低排放还是高排放情景下,中国森林生态系统的服务价值总体而言将增加。

本研究也能清晰地反映出我国森林态系统服务价值空间分布格局:西部及东北低;南部高,特别是华南地区最高。这与我国为数不多的王兵等[44]的空间分布研究结果基本一致。此外,本研究给出,未来 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下增幅在东部大于西部,南部大于北部;增幅比例高的地区主要分布在我国东北北端。减幅主要出现在新疆中部、内蒙古西部、甘肃西北部、西藏东南部以及我国东北和南方部分森林边缘地区。可见,未来排放情景下我国森林生态系统的服务价值在大部分地区都将升高。在少数地区,特别是常绿和落叶针叶林分布的地区及部分森林边缘,由于气候变化的影响及森林片段的边缘化效应,森林生态系统服务总价值将下降,表明这些地区生态系统服务功能的发挥将超出其承载力阈值,生态环境状况将不利于当前类型的森林生存,因而应该加强对该区域的保护和建设。

从各项森林生态系统服务功能所产生的价值来看,除了食物生产、废物处理及娱乐文化外,其他各项的贡献率基本都在 11%—18%之间。相对而言,土壤形成与保护(17.8%)>气体调节(16.0%)>生物多样性保护(14.9%)>水源涵养(14.6%)>气候调节(12.4%)>原材料生产(11.9%)。这种贡献率分布与前人的结论[17,19-20,49-50]近似,即我国森林的价值不仅表现在为人类提供原材料(11.9%)、食物(0.5%)等直接的经济价值,更为重要的是它所提供的潜在生态价值远高于森林本身的实物价值,即非物质价值比物质产品产出价值

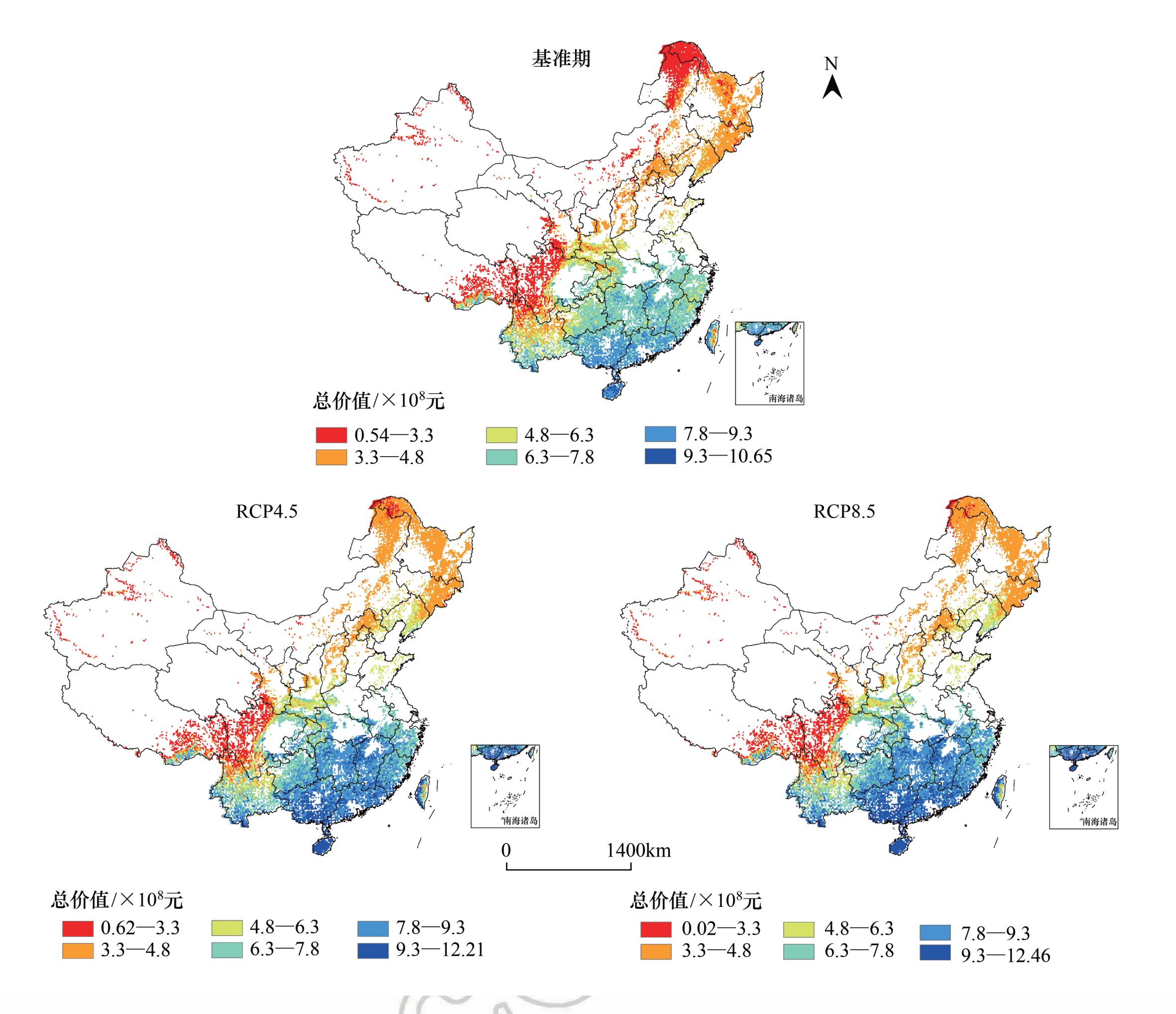


图 4　基准期及 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下我国森林生态系统服务年均总价值

Fig.4　Spatial distribution of the annual total forest ecosystem service value from 1971 to 2000 as a baseline period and from 2021 to 2050 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios in China

更高。因此,在对森林开发利用过程中,不能只注重眼前森林的物质产品利益,而更应该注重它为人类生态环境所创造的非物质价值,要优先考虑长久效益,这对经济、社会和生态效益的可持续发展具有重要意义。值得注意的是,之所以物质产品产出价值贡献率低,特别是食物生产的贡献率最低(0.5%),究其原因,主要溯源于评估方法的确定。本文的估算方法主要依据 Costanz 等的生态系统服务价值计算公式,以及参照谢高地等在 Costanz 等的基础上根据问卷调查提出的中国单位面积生态服务价值当量,这种确定方法可能仍然具有一定的局限性和不完善性。首先,Costanza 等是根据生态系统服务的个人偿付意愿进行计量,即采用的是费用支出法。在评估过程中,虽然他对资源环境进行了大的分类,但并没有考虑一些特殊的生态系统在价值构成上的特殊性[28],如自然保护区、经济林等区域。其次,谢高地等的问卷调查中,被调查对象都是从事生态学研究的专家学者,他们对生态服务的效用有足够深刻的理解,而且都生活于北京等生态环境问题特别突出的特大城市,给出的生态服务价值单价很可能偏高[51],因而物质产品产出价值单价相对偏低。

鉴于森林生态系统功能贡献的巨大服务价值,因此很有必要将生态系统服务价值的研究或评估工作纳入社会经济以及环境保护的决策体系中。如果仅以经济指标作为决策依据,很容易引起决策的失误,并造成对生态环境的破坏,降低生态效益。

生态系统服务经济价值评估的各种方法都具有一定的优点和不足。由于资料的限制,本研究呈现的森林生态系统服务价值是全国的平均状况,并未将森林进行类型划分,因而未能体现出不同空间位置不同森林类

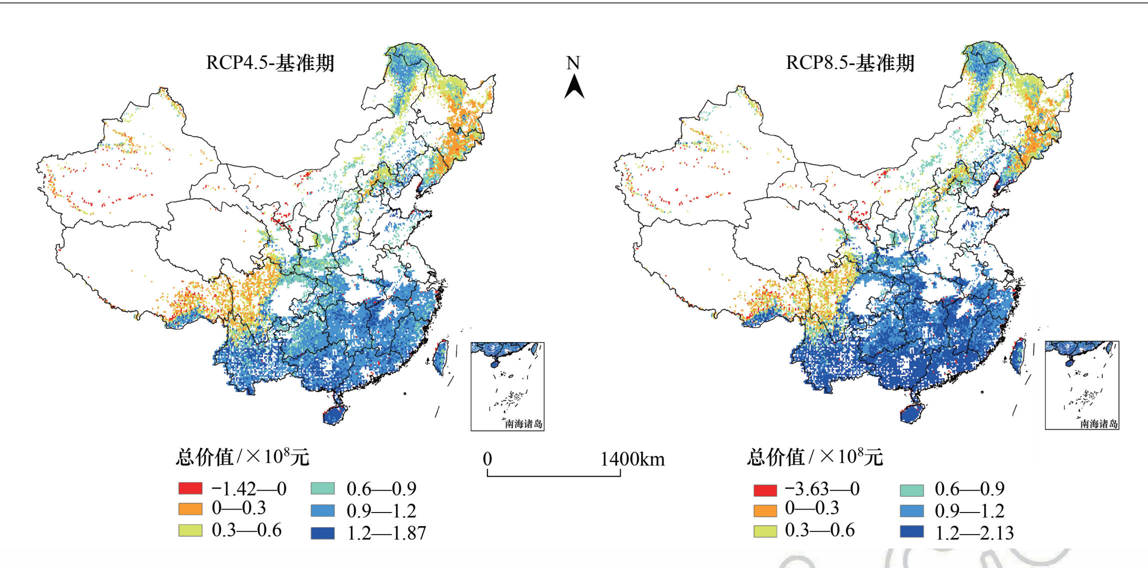


图 5 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下我国森林生态系统服务年均总价值变化幅度(相对于基准期)

Fig.5 Spatial distribution of the annual variation amplitude for the total forest ecosystem service value under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, relative to the baseline period, in China

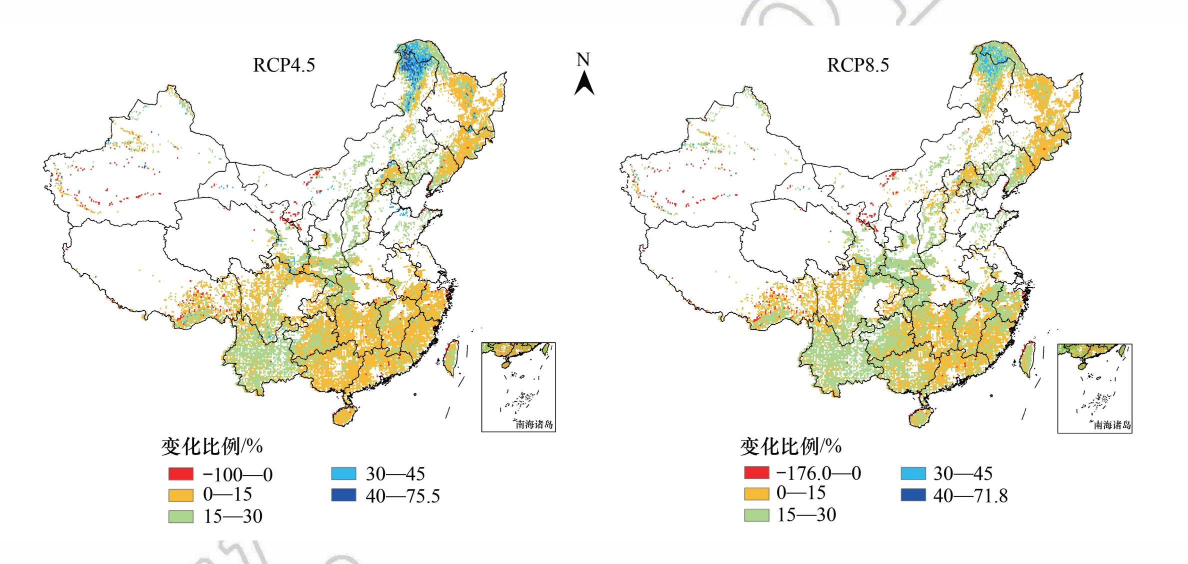


图 6 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下我国森林生态系统服务功能总价值变化比例(相对于基准期)

Fig.6 Spatial distribution of the variation percentage for the total forest ecosystem service value under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, relative to the baseline period, in China

型的生态系统服务价值,即忽略了生态系统内部的植被空间异质性及其机制分析。此外,单位面积生态系统服务功能价值不仅取决于生物量,而且很可能受不同空间位置的其他条件如地理环境、生态系统的结构与过程差异等的影响。

4 结论

(1)基准期(197—2000 年)及未来(2021—2050 年)RCP4.5 和 RCP8.5 情景下我国森林生态系统服务总价值均呈增加趋势,年平均值分别为 12.80(4.55—20.72)万亿元、14.81(5.26—23.97)万亿元、15.13(5.38—24.49)万亿元,RCP4.5 及 RCP8.5 情景比基准期分别增加 2.0 万亿元、2.3 万亿元。

(2)基准期及未来 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下我国森林生态系统服务价值空间分布均表现为西部及东北低,特别是新疆、东北北部、四川及其邻近的西藏东南部等地区最低(<3.3 亿元/a);南部高,特别是华南地区最高(>9.3 亿元/a)。

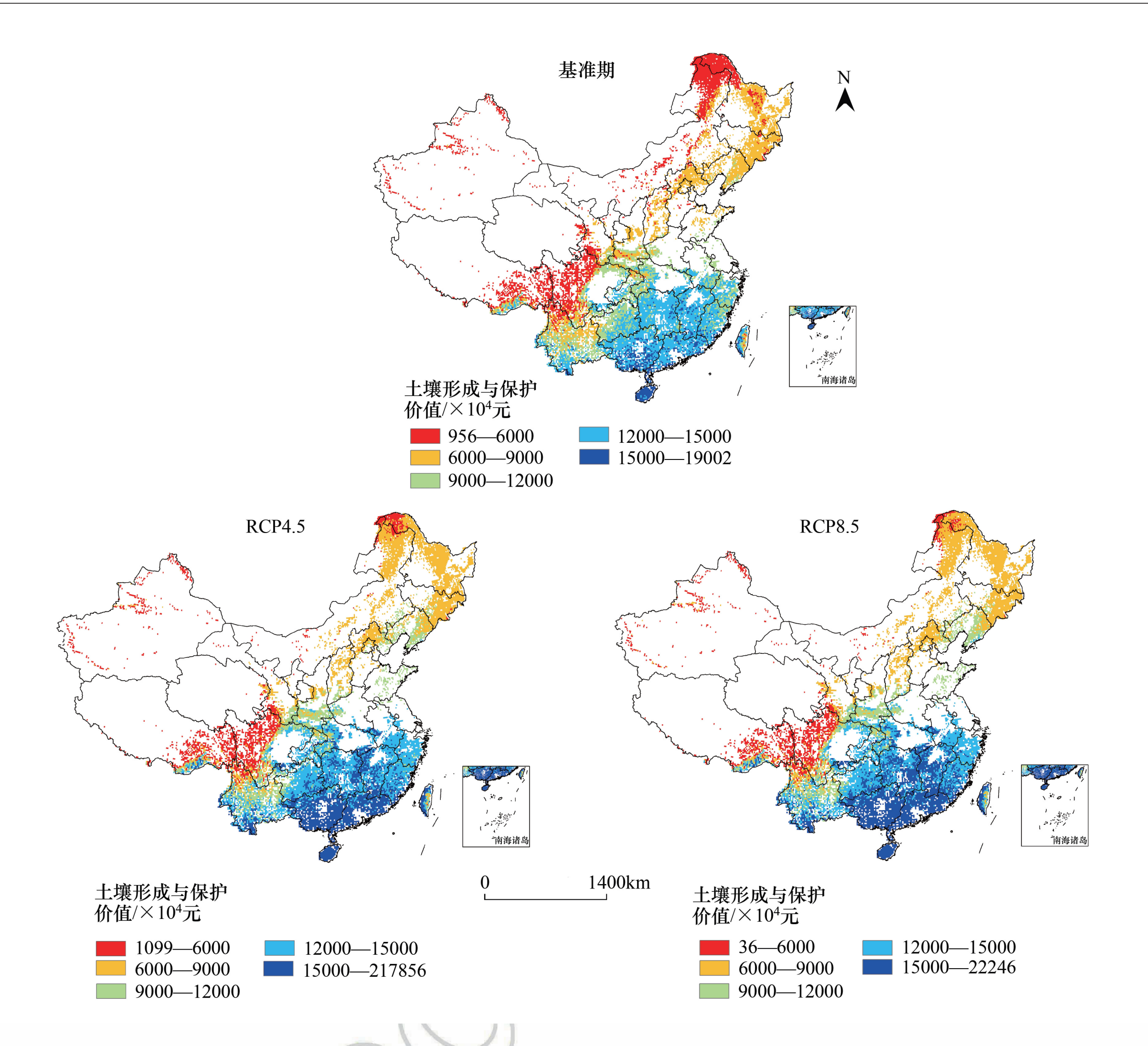


图 7　基准期及 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下我国森林生态系统服务功能价值主要构成项(土壤形成与保护)的空间分布

Fig.7　Spatial distribution of the main composition (soil formation and protection) **of forest ecosystem service value from 1971 to 2000 as a baseline period and from 2021 to 2050 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios in China**

RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,未来森林生态系统服务价值除了在少数地区(新疆中部、内蒙古西部、甘肃西北部、西藏东南部以及我国东北和南方部分森林边缘地区)表现为减少外(最大减幅分别达 1.42 亿元和 3.63 亿元),在其他地区均增加,且增幅在东部大于西部,南部大于北部,华南增幅最大,最大增幅分别达 1.87 亿元和 2.13 亿元。高增幅比例(>45%)主要分布在我国东北北端。

(3)我国森林生态系统服务价值及其各功能构成项贡献率,在基准期及未来 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下依次是:土壤形成与保护(2.285 亿元、2.643 亿元、2.700 亿元;17.8%)>气体调节(2.050 亿元、2.372 亿元、2.423 亿元;16.0%)>生物多样性保护(1.910 亿元、2.209 亿元、2.257 亿元;14.9%)>水源涵养(1.875 亿元、2.169 亿元、2.216 亿元;14.6%)>气候调节(1.582 亿元、1.830 亿元、1.869 亿元;12.4%)>原材料生产(1.523 亿元、1.762亿元、1.800 亿元;11.9%)>废物处理(7674 万元、8878 万元、9071 万元;6.0%)>娱乐文化(7498 万元、8674 万元、8862 万元;5.9%)>食物生产(586 万元、678 万元、692 万元;0.5%),即物质产品产出(原材料生产+食物生产)价值占 12.4%,非物质价值占 87.6%。

(4)土壤形成与保护是我国森林生态系统服务的主要功能构成项,其价值及其变化比例在全国范围的分布模式与总价值类似,但变化幅度稍有区别。RCP4.5 和 RCP8.5 情景下土土壤形成与保护(16.2%和 18.4%)比总价值(15.6%和 14.9%)平均变化比例大。

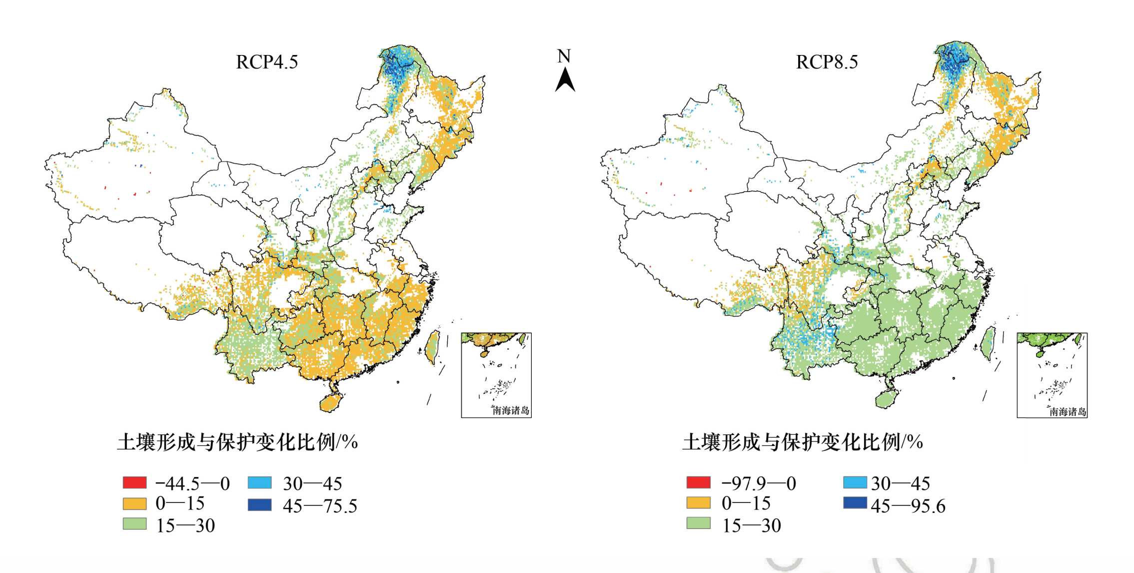


图 8 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下我国森林生态系统服务价值土壤形成与保护功能构成的变化比例(相对于基准期)

Fig.8 Spatial distribution of the variation percentage for the main composition (soil formation and protection) **of forest ecosystem service value under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, relative to the baseline period, in China**

该研究表明,我国森林生态系统服务功能为人类创造了巨大的生态效益,特别是非物质产品利益,有利于人类自身的可持续发展,因而要重视对森林生态系统的保护和建设,尤其要高度关注未来将超过生态系统承载力阈值而导致总价值下降的部分针叶林分布地区,如新疆中部、内蒙古西部、甘肃西北部、西藏东南部以及我国东北和南方部分森林边缘地区。

参考文献(References):

[1] 陈仁利, 余雪标, 黄金城, 陈磊夫. 森林生态系统服务功能及其价值评估. 热带林业, 2006, 34(2): 15-18.
[2] 张志强, 徐中民, 王建, 程国栋. 黑河流域生态系统服务的价值. 冰川冻土, 2001, 23(4): 360-366.
[3] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
[4] Daily G C, Söderqvist T, Aniyar S, Arrow K, Dasgupta P, Ehrlich P R, Folke C, Jansson A, Jansson B O, Kautsky N, Levin S, Lubchenco J, Mäler K G, Simpson D, Starrett D, Tilman D, Walker B. The value of nature and the nature of value. Science, 2000, 289(5478): 395-396.
[5] Kaltenborn B P, Linnell J D C, Baggethun E G, Lindhjem H, Thomassen J, Chan K M. Ecosystem services and cultural values as building blocks for 'the good life'. A case study in the community of Røst, Lofoten Islands, Norway. Ecological Economics, 2017, 140: 166-176.
[6] Kim J E. The value of ecosystem services based on land use in Shinangun, Jeonnam, Korea. Korean Journal of Ecology and Environment, 2014, 47(3): 202-213.
[7] Kindu M, Schneider T, Teketay D, Knoke T. Changes of ecosystem service values in response to land use/land cover dynamics in Munessa-Shashemene landscape of the Ethiopian highlands. Science of the Total Environment, 2016, 547: 137-147.
[8] Estoque R C, Murayama Y. Quantifying landscape pattern and ecosystem service value changes in four rapidly urbanizing hill stations of Southeast Asia. Landscape Ecology, 2016, 31(7): 1481-1507.
[9] Reynaud A, Lanzanova D. A global meta-analysis of the value of ecosystem services provided by lakes. Ecological Economics, 2017, 137: 184-194.
[10] Chaikaew P, Hodges A W, Grunwald S. Estimating the value of ecosystem services in a mixed-use watershed: a choice experiment approach. Ecosystem Services, 2017, 23: 228-237.
[11] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. Global Environmental Change, 2014, 26: 152-158.
[12] Honey-Rosés J, Schneider D W, Brozović N. Changing ecosystem service values following technological change. Environmental Management, 2014, 53(6): 1146-1157.
[13] Tilahun M, Damnyag L, Anglaaere L C N. The ankasa forest conservation area of Ghana: ecosystem service values and on-site REDD+opportunity cost. Forest Policy and Economics, 2016, 73: 168-176.
[14] Sherrouse B C, Semmens D J, Clement J M. An application of Social Values for Ecosystem Services (SolVES) to three national forests in Colorado and Wyoming. Ecological Indicators, 2014, 36: 68-79.
[15] Fujii H, Sato M, Managi S. Decomposition analysis of forest ecosystem services values. Sustainability, 2017, 9(5): 687, doi: 10.

3390/su9050687.
[16] 侯元兆，王琦. 中国森林资源核算研究. 世界林业研究，1995，8(3)：51-56.
[17] 蒋延玲，周广胜. 中国主要森林生态系统公益的评估. 植物生态学报，1999，23(5)：426-432.
[18] 赵景柱，徐亚骏，肖寒，赵同谦，段光明. 基于可持续发展综合国力的生态系统服务评价研究——13 个国家生态系统服务价值的测算. 系统工程理论与实践，2003，23(1)：121-127.
[19] 赵同谦，欧阳志云，郑华，王效科，苗鸿. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. 自然资源学报，2004，19(4)：480-491.
[20] 靳芳，鲁绍伟，余新晓，饶良懿，牛建植，谢媛媛，张振明. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. 应用生态学报，2005，16(8)：1531-1536.
[21] 余新晓，鲁绍伟，靳芳，陈丽华，饶良懿，陆贵巧. 中国森林生态系统服务功能价值评估. 生态学报，2005，25(8)：2096-2102.
[22] 鲁绍伟. 中国森林生态服务功能动态分析与仿真预测. 北京：北京林业大学，2006.
[23] 国家林业局. 森林生态系统服务功能评估规范(LLY/T1721—2008). 北京：中国标准出版社，2008.
[24] Peng W F，Zhou J M，Fan S Y，Yang C J. Effects of the land use change on ecosystem service value in Chengdu，western China from 1978 to 2010. Journal of the Indian Society of Remote Sensing，2016，44(2)：197-206.
[25] Yan F Q，Zhang S W，Liu X T，Chen D，Chen J，Bu K，Yang J C，Chang L P. The effects of spatiotemporal changes in land degradation on ecosystem services values in Sanjiang Plain，China. Remote Sensing，2016，8(11)：917，doi：10.3390/rs8110917.
[26] Zhang H，Wang Q，Li G Y，Zhang H P，Zhang J. Losses of ecosystem service values in the Taihu Lake Basin from 1979 to 2010. Frontiers of Earth Science，2017，11(2)：310-320.
[27] 周金明. 建阳市森林生态系统服务价值动态评估. 福建林业科技，2015，42(1)：80-83，99-99.
[28] 陈理军，姚娟. 喀纳斯保护区森林生态系统服务价值动态评估. 福建林业科技，2016，43(2)：55-61.
[29] 殷莎，赵永华，韩磊，王耀斌，蔡健. 秦岭森林生态系统服务价值的时空演变. 应用生态学报，2016，27(12)：3777-3786.
[30] Kubiszewski I，Costanza R，Anderson S，Sutton P. The future value of ecosystem services：global scenarios and national implications. Ecosystem Services，2017，26：289-301.
[31] Heubes J，Heubach K，Schmidt M，Wittig R，Zizka G，Nuppenau E A，Hahn K. Impact of future climate and land use change on non-timber forest product provision in Benin，West Africa：linking niche-based modeling with ecosystem service values. Economic Botany，2012，66(4)：383-397.
[32] 张明军，周立华. 气候变化对中国森林生态系统服务价值的影响. 干旱区资源与环境，2004，18(2)：40-43.
[33] Jia G D，Yu X X，Song S M，Fan D X，Deng W P. Dynamic analysis of forest land changeover and forest ecosystem services value in North China：a case study in Chaobai River Basin. Vegetos，2012，25(2)：37-43.
[34] 谢高地，鲁春霞，冷允法，郑度，李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报，2003，18(2)：189-196.
[35] 虞依娜，彭少麟. 生态系统服务价值评估的研究进展. 生态环境学报，2010，19(9)：2246-2252.
[36] Cao M K，Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. Nature，1998，393(6682)：249-252.
[37] 刘国华，傅伯杰，方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. 生态学报，2000，20(5)：733-740.
[38] 方精云，刘国华，徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报，1996，16(5)：497-508.
[39] Whittaker R H，Likens G E. Carbon in the biota//Woodwell G M，Pecan E V，eds. Carbon and the Biosphere. Virginia：Springfield，1973：281-302.
[40] 冯宗炜，王效科，吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京：科学出版社，1999：226-227.
[41] 刘世荣，徐德应，王兵. 气候变化对中国森林生产力的影响 Ⅰ. 中国森林现实生产力的特征及地理分布格局. 林业科学研究，1993，6(6)：633-642.
[42] 李高飞，任海. 中国不同气候带各类型森林的生物量和净第一性生产力. 热带地理，2004，24(4)：306-310.
[43] 杨洪晓，吴波，张金屯，林德荣，常顺利. 森林生态系统的固碳功能和碳储量研究进展. 北京师范大学学报(自然科学版)，2005，41(2)：172-177.
[44] 王兵，任晓旭，胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估. 林业科学，2011，47(2)：145-153.
[45] 谢高地，张彩霞，张昌顺，肖玉，鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学，2015，37(9)：1740-1746.
[46] 陈仲新，张新时. 中国生态系统效益的价值. 科学通报，2000，45(1)：17-22.
[47] 余新晓，秦永胜，陈丽华，刘松. 北京山地森林生态系统服务功能及其价值初步研究. 生态学报，2002，22(5)：627-630.
[48] Guo H，Wang B，Ma X Q，Zhao G D，Li S N. Evaluation of ecosystem services of Chinese pine forests in China. Science in China Series C：Life Sciences，2008，51(7)：662-670.
[49] 张颖，张艳. 生态补偿标准的制订应考虑农户的意愿——以江西省瑞昌市森林生态补偿调查为例. 生态经济，2013，(2)：106-109.
[50] 韦惠兰，祁应军. 森林生态系统服务功能价值评估与分析. 北京林业大学学报，2016，38(2)：74-82.
[51] 谢高地，甄霖，鲁春霞，肖玉，陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报，2008，23(5)：911-913.